Vol.13, No.2, Summer 2024, pp.162-185

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2023.81109.1334 Open access

Modeling and Prediction of Groundwater Level in Izadkhast Plain, Fars Province

Maryam Ansari [a], Iraj Jabbari [*b]

[a] *PhD in Geomorphology, Razi University, Kermanshah, Iran*
[b] *Associate Professor in Geomorphology, Razi University, Kermanshah, Iran*

Received: 13 February 2023 ***Revised: 17 May 2023*** ***Accepted: 1 June 2023***

Abstract

Given the limited underground water resources in Iran, careful calculation, proper use, regulation, and maintenance of these resources are crucial. One effective approach for managing and exploiting these resources optimally, both now and in the future, is through modeling. This study focuses on the challenges faced by groundwater in the Izadakhat Basin, employing GMS software and MODFLOW code to model and forecast water levels under both steady and unsteady conditions. Three scenarios are considered: continuation of current trends, a 20% decrease in precipitation, and a 20% increase in precipitation. The results indicate that, under current conditions, the water table is projected to drop by 2.786 meters. A 20% decrease in precipitation would increase this decline to 3.77 meters, while a 20% increase in precipitation would reduce the drop to 1.77 meters. In other words, the water level fluctuates by about 1 meter with a 20% change in precipitation. Over the three-year period studied (2015–2017), the first scenario suggests a steady decline of 2.786 meters every three years if current conditions persist. These findings highlight the importance of surface water storage in the region to replenish groundwater levels. Moreover, the analysis underscores the significant impact of human activity on both the quantity and quality of groundwater resources in the study area, emphasizing the need for improved resource management.

Keywords: Undergroundwater level flactuations**,** Groundwater level fluctuation, Groundwater resource management, Aquifer, MODFLOW code, Izadkhast plain, Iran

* .Corresponding author: Iraj Jabbari Email: Iraj.jabbari@razi.ac.ir Tel:+989188332017

How to cite this Article: Ansari, M., & Jabbari, I. (2024). Modeling and Forecasting of the GroundWater Level in the Izadkhasht Plain, Fars Province, Fars province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(2), 162-185.

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۸۵-۱۶۲

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی

DOI:10.22067/geoeh.2023.81109.1334

دسترسی آزاد

مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی دشت ایزدخواست استان فارس

مریم انصاری- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

ایرج جباری[1] - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ **دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۲۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۳/۱۱**

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب زیرزمینی در ایران، محاسبه دقیق، استفاده صحیح، تنظیم و نگهداری این منابع از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های مؤثر برای مدیریت و بهره‌برداری بهینه از این منابع در حال و آینده، استفاده از مدل‌سازی است. این مطالعه بر چالش‌های مرتبط با منابع آب زیرزمینی در حوضه ایزدخواست تمرکز دارد و با استفاده از نرم‌افزار GMS و کد MODFLOW به مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح آب در شرایط پایدار و ناپایدار می‌پردازد. سه سناریو موردبررسی قرار گرفته است: ادامه روند فعلی، کاهش ۲۰ درصدی بارش و افزایش ۲۰ درصدی بارش. نتایج نشان می‌دهد در شرایط فعلی، سطح آب زیرزمینی به میزان ۲.۷۸۶ متر کاهش خواهد یافت. با کاهش ۲۰ درصدی بارش، این افت به ۳.۷۷ متر خواهد رسید و با افزایش ۲۰ درصدی بارش، این افت به ۱.۷۷ متر کاهش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر، سطح آب با تغییر ۲۰ درصدی بارش تقریباً ۱ متر نوسان می‌کند. طی دوره سه‌ساله مطالعه‌شده (۱۳۹۴–۱۳۹۶)، سناریوی اول نشان می‌دهد در صورت ادامه شرایط فعلی، سطح آب هر سه سال یک‌بار به‌طور ثابت ۲.۷۸۶ متر کاهش خواهد یافت. این یافته‌ها بر اهمیت ذخیره آب‌های سطحی در منطقه برای تقویت سطح آب‌های زیرزمینی تأکید دارند. همچنین، تحلیل نتایج نشان می‌دهد یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر در کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مطالعه‌شده، عوامل انسانی است که باید در مدیریت این منابع موردتوجه قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: نوسان سطح آب زیرزمینی، مدیریت منابع آب زیرزمینی، آبخوان، کدMODFLOW، دشت ایزدخواست، ایران

[1]. نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۸۳۳۲۰۱۷ Email:Iraj.jabbari@razi.ac.ir

مقدمه

قسمت اعظم آب شیرین موجود در کره زمین در زیر زمین قرار دارد. افزایش جمعیت، افزایش تقاضا بر منابع آب زیرزمینی را سبب شده است. به علت بهره‌برداری روزافزون از منابع آب زیرزمینی، مسائل جدیدی مطرح گردیده و موضوع مدیریت بهره‌برداری اقتصادی و مجاز و صیانت منابع نیز موردتوجه قرار گرفته است. ازآنجاکه منابع آب زیرزمینی کشور ایران محدود و درخور توجه است، این کمبود ایجاب می‌کند که در محاسبه مقدار آب موجود و استفاده صحیح و تنظیم و نگهداشت منابع آب زیرزمینی دقت کامل به عمل آید تا بتوان به‌طور مستمر و حتی برای نسل‌های بعدی از این منابع استفاده کرد. در واقع مکانیسم‌ها و شرایط مختلف مؤثر بر منابع آب زیرزمینی، تغییراتی در حجم ذخیره و سطح آب سفره‌های آبی به وجود می‌آورد که جهت برنامه‌ریزی، کنترل و مدیریت صحیح باید تحت نظارت دقیق پیش‌بینی‌های به‌موقع قرار گیرند (Kamali Ardakani, 2019). یکی از روش‌های مفید برای مدیریت و بهره‌برداری بهینه در زمان حال و آینده استفاده از روش‌های مدل‌سازی است.

به‌طورکلی مدل‌ها به سه گروه مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ریاضی و مدل‌های آنالوگ تقسیم می‌شوند. مدل‌های ریاضی ممکن است به‌صورت معین یا احتمالاتی یا ترکیبی از هر دو باشند. این مدل به مدل‌های تحلیلی و عددی نیز طبقه‌بندی می‌شوند (Kamali Ardakani, 2019) که متداول‌ترین مدل‌های مدل‌سازی سطح تراز آب زیرزمینی از این گروه می‌باشند.

در همین راستا در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح تراز آب‌های زیرزمینی از مدل‌های متفاوتی استفاده شده است (Knotters & Bierkens, 2001; Mackay, Jackson, & Wang, 2014; Shakya et al., 2022; Tao et al., 2022; Chidepudi et al., 2023; Mirzaei & Nazemi, 2011; Afruzi, & Zare Abyaneh, 2017; Akhoni Pourhosseini, Asadi, 2017) اما مدل MODFLOW برجسته‌ترین مدل در روش‌های ارزیابی منابع آب با استفاده از مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی است (McDonald & Harbaugh, 1988) و بیش‌ترین تحقیقات در مورد مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در جهان توسط مدل

MODFLOW انجام شده است (Rahmawati et al., 2013; Shakoor et al., 2018) که جریان را به‌صورت سه‌بعدی و به روش تفاضل محدود مدل می‌نماید.

مدل MODFLOW توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده در سال ۱۹۸٤ توسعه یافت (McDonald & Harbaugh, 1988) و به‌سرعت در نقاط مختلف دنیا جهت مدل‌سازی سطح تراز آب زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفت (Rayne et al., 2001; Wang et al., 2008; Kushwaha et al., 2009; Shakoor et al., 2018; Pande et al., 2022; Katibeh & Hafezi, 2005; Heydari & Jabbari, 2022; Masoumi et al., 2021) در همین راستا برخی محققین در خصوص شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی از این مدل استفاده کردند (Jovanovic et al., 2009; Mondal & Singh, 2009; Parameswari, & Mudgal, 2015) برخی نیز جهت مدل‌سازی فرونشست (Rashvand et al., 2019; Rajabi et al., 2021)، بررسی رابطه متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی(Yanxun et al., 2011; Mehl & Hill, 2010) و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم (Patil et al., 2020; Abbasnouvinpour et al., 2022) و خشکسالی (Atayizadeh & Chit Sazan, 2018; Porhaghi, et al. 2014) از مدل مذکور استفاده کردند و مورد تأیید قرار دادند.

بنابراین در این راستا و با توجه به اهمیت این موضوع و مشکلاتی از قبیل اقلیم گرم و خشک، پتانسیل بالای تبخیر و تعرق و شوری بالای آب‌های زیرزمینی در استان فارس که تهدیدی جدی برای شور شدن خاک و کویری شدن منطقه است، سبب تمرکز بر روی این منطقه شده است. منطقهٔ موردمطالعه در جنوب استان فارس، واقع در بخش مرکزی شهرستان زرین‌دشت انتخاب شده است. این منطقه یک حوضهٔ بسته است که کمبود آب مطلوب و شور شدن آب‌وخاک در سال‌های اخیر مانع جدی برای کشاورزی و معیشت مردم شده است. به‌طوری‌که ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی باعث تغییر کمیت و کیفیت منابع آب شده و مشکلات مضاعفی را برای این منطقه به وجود آورده است. همچنین در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت، چاه‌هایی که برای مصارف خانگی استفاده می‌شوند، از حالت کم‌عمق به نیمه‌عمیق تبدیل و تعداد قابل‌توجهی از چاه‌های بهره‌برداری نیز خشک شده‌اند و به‌دلیل کمبود آب در چاه‌های کم‌عمق، کشت و زرع کاهش پیدا

کرده است. حتی در بعضی مناطق استفاده از آب شور جهت کشاورزی همراه با کیفیت پایین خاک و سایر شیوه‌های غلط مدیریت منجر به تأثیرات زیان‌آور به منابع خاک شده است. این در حالی است که با توجه به بحران، کمبود و شوری آب در منطقه اقدامات مناسبی جهت مدیریت منابع آب انجام نشده است؛ بنابراین با توجه به مشکلات مذکور، در پژوهش حاضر سعی بر این است که ضمن بررسی مشکلات ایجاد شده سطح تراز آب زیرزمینی حوضه ایزدخواست با استفاده از نرم‌افزار GMS با کد MODFLOW در شرایط ماندگار و غیر ماندگار مدل‌سازی و در سه سناریوی تداوم شرایط جاری، کاهش و افزایش ۲۰ درصدی بارش پیش‌بینی انجام شود.

۱- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

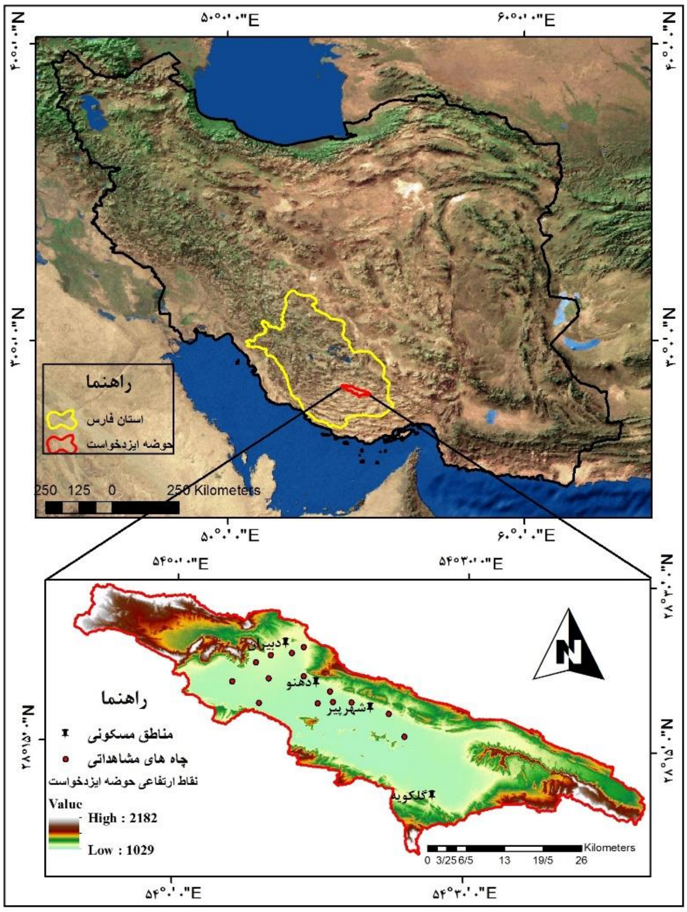
حوضه آبریز ایزدخواست با مختصات "۲۹ '٤۹ °۵۳ تا "۲۸ '٤۸ °٥٤ طول شرقی و "٥۲ '۰٦ °۲۸ تا "۲۰ '۲۹ °۲۸ عرض شمالی یکی از کفه‌های بستهٔ حوضهٔ آبریز رودخانهٔ مند واقع در استان فارس است (شکل ۱). مساحت این حوضه ۱۳۷۱/۳ کیلومترمربع است که ارتفاعات ۸۷۹/٦ و دشت ٤۹۱/۷ کیلومترمربع از کل مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. حداکثر ارتفاع در حوضه ۲۱۸۲ و حداقل ارتفاع ۱۰۲۹ متر است. این حوضه دارای میانگین بارش سالانه ۲۲۲/۱ میلی‌متر، میانگین سالانه دما ۱۹/۵ درجه و متوسط تبخیر سالانه از تشتک ۲۹۵۵/۹ میلی‌متر است(Ansari et al., 2021 a) .

از نظر هیدرولوژی در این حوضه رودخانهٔ دائمی وجود نداشته و کلیه جریان‌ها موقت و فصلی می‌باشند که تمامی جریان‌های سطحی منطقه به‌صورت همگرا از حاشیه به سمت مرکز دشت جریان یافته و درنهایت در مرکز و غرب دشت تجمع می‌یابند. در مرکز دشت آب‌های راکد پس از تبخیر، اراضی شور و غیرقابل استفاده را نمایان می‌سازند. عمده‌ترین مسیل‌های منطقه مسیل خشک آنگبینه واقع در غرب روستای دوبران، مسیل خشک چاه زبر و مسیل خشک گلکویه (گلکان) هستند (Ansari et al., 2021 b) . این جریان‌ها بر روی سازندهای مقاوم‌تر مانند آسماری جهرم که دارای شکستگی‌ها ودرز و شکاف فراوان هستند بستر خود را به

شکل درّه‌های ژرف V مانند تبدیل ساخته‌اند اما بر روی سازندهای سست‌تری مانند آغاجاری دارای بستری پهن هستند و اغلب آن‌ها پس از ورود به دشت بستر مشخصی ندارند.

۲-۲- روش انجام پژوهش

جهت مدل‌سازی سطح تراز آب‌های زیرزمینی در این تحقیق از نرم‌افزار رابط GMS و کد MODFLOW استفاده می‌شود. این نرم‌افزار که مدل MODFLOW را در خود جای داده است، با امکانات مختلفی که به آن افزوده شده است نسبت به خود نرم‌افزار MODFLOW توانایی بیشتری در وارد کردن داده‌ها، ساخت و تحلیل مدل دارد.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

Fig.1. **Location of the study area**

کد MODFLOW بر پایه حل معادلات حرکت آب‌های زیرزمینی است به‌طوری‌که حرکت سه‌بعدی آب زیرزمینی با چگالی ثابت به‌وسیله معادله دیفرانسیلی جزئی (رابطه ۱) با استفاده از روش تفاضل محدود و بر اساس معادله پیوستگی حل می‌شود.

رابطهٔ ۱: $$Ss\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[Kxx\frac{\partial h}{\partial x}\right] - \frac{\partial}{\partial y}\left[Kyy\frac{\partial h}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[Kzz\frac{\partial h}{\partial z}\right] - W$$

K: هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، h: بار پتانسیل (متر)، W: بیانگر شار حجمی در واحد حجم و نشانگر تغذیه و تخلیه آب، Ss: ذخیره مخصوص مواد متخلخل، t: زمان (روز) و x، y و z بیانگر مختصات است.

برای ایجاد مدل جریان در نرم‌افزار GMS از روش مدل مفهومی[1] استفاده شده است. در این روش ابزارهای GIS و مدل Map به‌کار برده می‌شوند. تمامی داده‌های موجود در منطقه ازجمله موقعیت منابع تغذیه و تخلیه مانند موقعیت چاه‌ها و تغذیه سطحی، پارامترهای لایه از قبیل هدایت هیدرولیکی، مرزهای مدل و اطلاعات دیگر موردنیاز برای مدل‌سازی در سطح مدل مفهومی موردبررسی قرار گرفت و به نرم‌افزار داده شد. سپس شبکه ایجاد و مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای[2] تبدیل می‌گردد. محدوده دشت به مدل وارد می‌شود، سپس هر یک از ویژگی‌های آبخوان، منابع تغذیه و تخلیه و چاه‌های مشاهده‌ای در یک پوشش جداگانه تعریف می‌شوند. در مدل مفهومی محدوده موردمطالعه، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای به مدل داده شد. به‌طورکلی ساختار مدل مفهومی آبخوان شامل محدوده مدل‌سازی و توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیک، تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و میزان آب برگشتی آن‌ها، چاه‌های مشاهداتی، میزان تغذیه از سطح به آبخوان و شرایط مرزی آبخوان خواهد بود.

در ادامه، اطلاعات جمع آوری شده در مدل مفهومی شامل مقادیر پارامترهای فیزیکی (ضخامت لایه آبدار، ضریب تخلخل و غیره) و هیدرودینامیکی (ضریب هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال) در آبخوان و هم چنین مقادیر تغذیه (نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف) و تخلیه از آبخوان (پمپاژ چاه‌ها) با

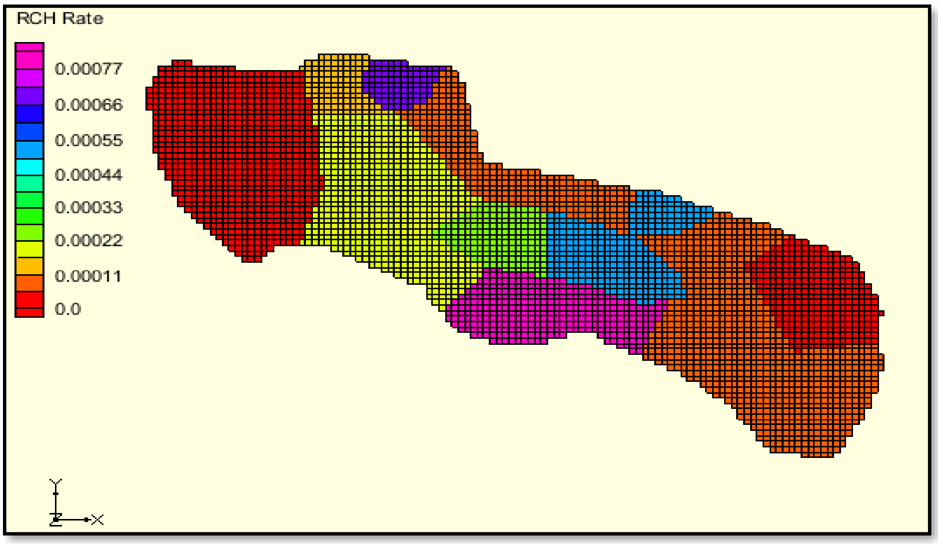
1. Conceptual Model Approach
2. Grid Model

استفاده از داده‌های سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس، سازمان هواشناسی و DEM ۱۲/۵ متر منطقه به مدل ریاضی منتقل شد و هرکدام توسط نماد مختص به خود نمایش داده شد.

با توجه به نبود اطلاعات هدایت هیدرولیکی در منطقه موردمطالعه داده‌های مربوط به ضریب قابلیت انتقال محدوده موردنظر از سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس تهیه گردید و از تقسیم ضریب قابلیت انتقال به ضخامت لایه اشباع آبخوان، هدایت هیدرولیکی قسمت‌های مختلف دشت تخمین زده شد، مراحل آماده‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. همچنین با توجه به مطالعات انجام‌شده توسط وزارت نیرو، ضریب ذخیره آبخوان دشت ایزدخواست به‌طور متوسط ۵ درصد در نظر گرفته شد و به‌مدل معرفی گردید. از طرفی باید توجه داشت که میزان ضریب ذخیره و آبدهی ویژه یکی هستند و به یک معنا می‌باشند.

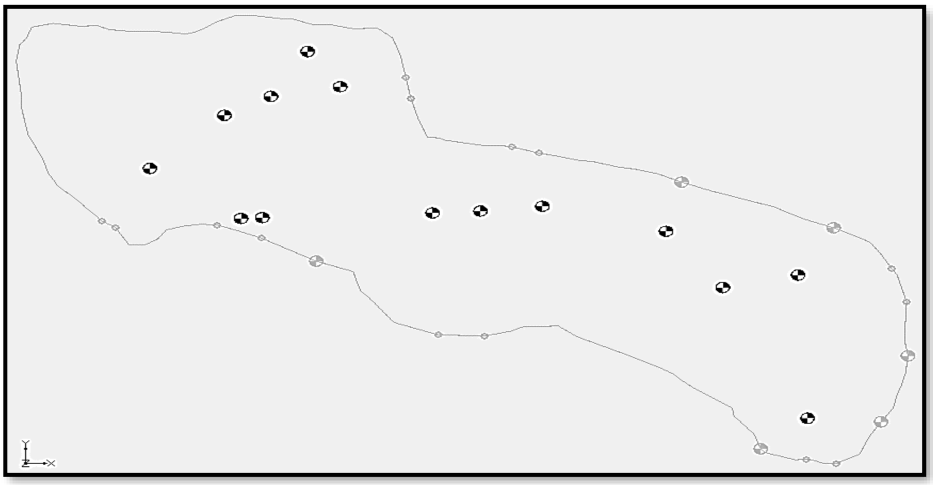
در مرحلهٔ بعد با توجه به مقدار بارش و ضریب نفوذپذیری مقدار تغذیه ناشی از بارندگی مشخص شد. پس از آن چاه‌های کشاورزی دشت مشخص گردید. با توجه به ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و پیرامون دشت برگرفته از سایت سازمان هواشناسی استان فارس، مقدار متوسط بارندگی استخراج شد و با توجه به مطالعات پایه انجام شده ضریب نفوذ بارندگی در تمام سطح دشت برابر ۵ درصد در نظر گرفته شد (سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس،۱۳۹٤) (شکل ۲). لازم به ذکر است که مدل‌سازی سطح تراز آب زیرزمینی فقط در دشت منطقهٔ موردمطالعه انجام شده است.

در مرحلهٔ بعد چاه‌های مشاهداتی به‌وسیله نرم‌افزارهای GIS و Excel آماده شدند و بعد از تبدیل به فرمت (Text Files) و یا (Shape Files) به GMS، در سطح مدل مفهومی (در ماژول نقشه) وارد و پس از آن، به مدل شبکه‌ای سه‌بعدی MODFLOW تبدیل شدند. سطح آب به نقاط مشاهده‌ای (شکل ۳) که از قبل تعیین شده بودند، تخصیص داده شد. سپس تعداد ۱۲۳ حلقه چاه بهره‌برداری (شکل ٤) در محدوده دشت ایزدخواست با استفاده از اطلاعات سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس با حجم کل تخلیه سالانه از چاه‌های موجود در این آماربرداری حدود ۳۰ میلیون مترمکعب محاسبه گردید.



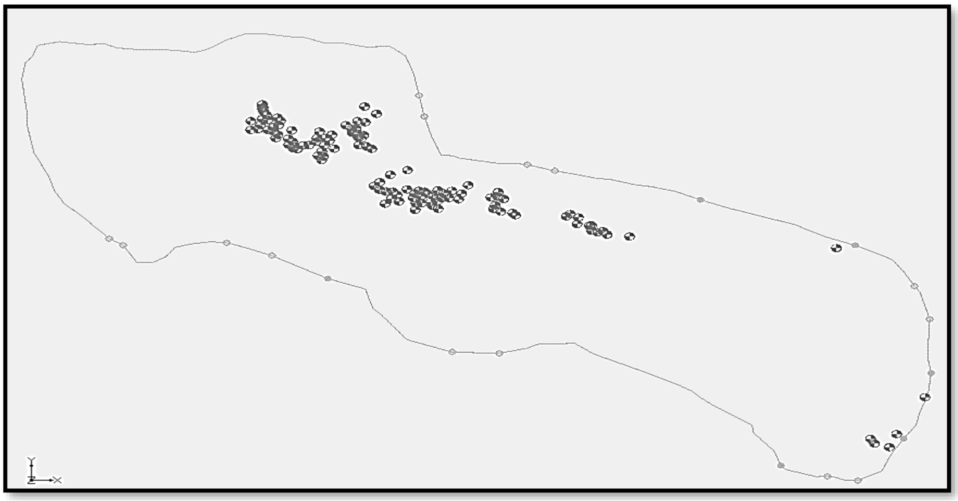
شکل ۲- تغذیه از سطح آبخوان

Fig.2. Recharge from the aquifer surface



شکل ۳- پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه موردمطالعه

Fig.3. Distribution of observation wells in the study area



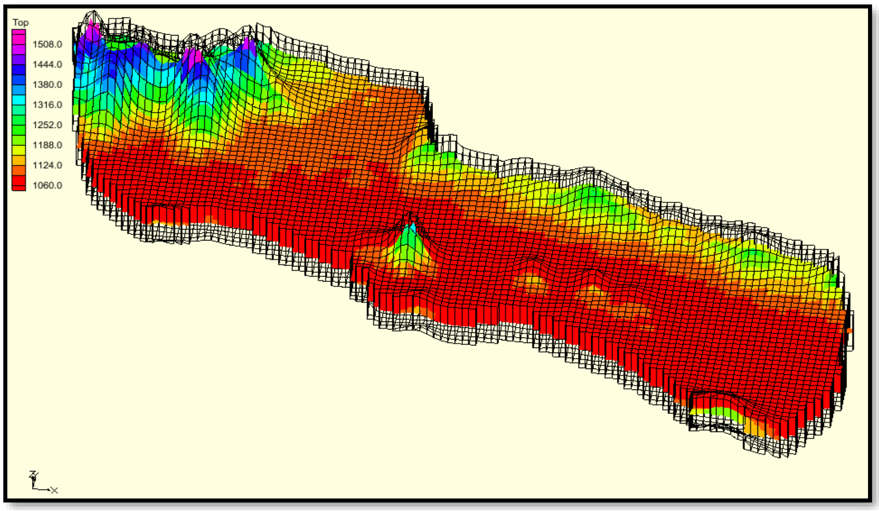
شکل ٤- پراکنش چاه‌های بهره‌برداری در منطقه موردمطالعه

Fig.4. Distribution of extraction wells in the study area

در مرحلهٔ بعد اطلاعات رقومی توپوگرافی سطح زمین از داده‌های DEM و با استفاده از نرم‌افزار GIS استخراج گردید و به‌صورت فایل shp به مدل وارد شد. سپس با استفاده از درون‌یابی، کلیه نقاط به‌طور مستقیم به شبکه مدل نسبت داده شد. نقشه مدل رقومی ارتفاعی و سنگ کف آبخوان نیز به کمک داده‌های ژئوفیزیک و نقشه تغییرات ضخامت آبخوان ساخته شد (شکل‌های ٥ و ٦).

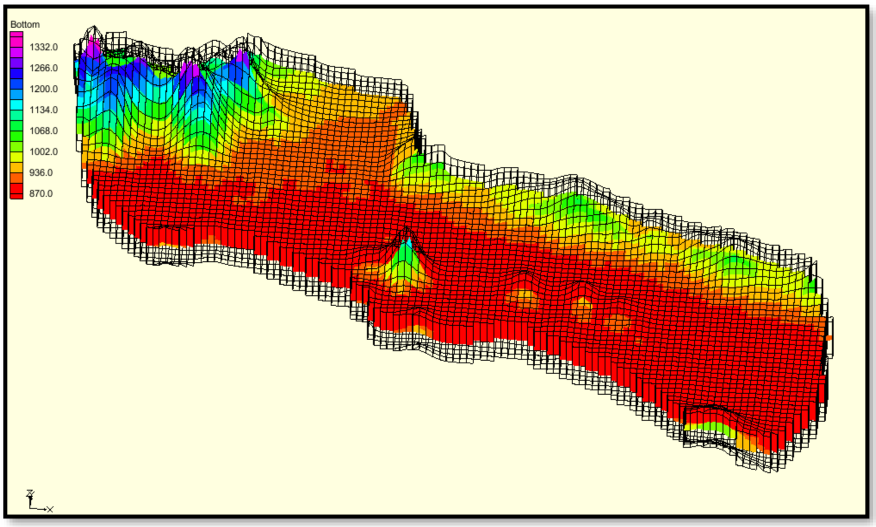
پس از مشخص کردن پارامترهای زمانی و پارامترهای هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک برای هر سلول مدل، توصیف دقیق شرایط مرزی با استفاده از مناسب‌ترین بسته‌های MODFLOW صورت می‌گیرد. در این مرحله از تحقیق، شرایط مرزی سفره عمدتاً طبق نتایج مطالعات پایه آب‌های زیرزمینی و بر اساس نقشه‌های تراز آب، داده‌های مشاهداتی دشت و شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی سفره تعیین شده است. مناطقی که هم‌جوار سازندهای نفوذپذیر قرار داشتند به‌عنوان مرزهای نفوذناپذیر تعیین شدند. سال آبی ١٣٩٤-١٣٩٥ به علت کامل بودن اطلاعات در این سال به‌عنوان سال پایه شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند و مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در مهرماه ٩٤ که ماه حداقل سطح آب در منطقه بود به‌عنوان شرایط اولیه در حالت پایدار انتخاب گردیدند. همچنین شبیه‌سازی سطح آب و واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار در مهرماه سال آبی ١٣٩٦-١٣٩٤ انجام گردید.

بنابراین پس از تعیین تمام داده‌های موردنیاز کد MODFLOW-2000، مدل آماده اجرا است. در ابتدا با استفاده از Model Checker خطاهای احتمالی بررسی می‌شود و تصحیح می‌گردد. در مرحله بعد یکی از روش‌های محاسباتی MODFLOW را انتخاب و مدل اجرا می‌شود که در این مطالعه از روش تکرار PCG2 استفاده گردید. معمولاً در اولین اجرا، برازش مناسبی بین بار هیدرولیکی محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده به دست نخواهد آمد. بنابراین برای رسیدن به یک برازش قابل‌قبول باید خطاهای احتمالی موجود در فرایند مدل‌سازی شناسایی و تا حد ممکن رفع گردد و مدل واسنجی شود که در این مطالعه از روش واسنجی دستی و همچنین از کد PEST جهت واسنجی اتوماتیک مدل استفاده گردید.



شکل ۵- نقشه DEM منطقه موردمطالعه

Fig.5. DEM map of the study area



شکل ٦- نقشه کف آبخوان منطقه موردمطالعه

Fig.6. Map of the aquifer bottom in the study area

واسنجی مدل را می‌توان برای شرایط ماندگار و غیرماندگار و یا هر دو انجام داد. برای ارزیابی نتایج واسنجی از امکانات نرم‌افزار GMS از پارامتر RMSE جهت محاسبه اختلاف سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده و سطح ایستابی مشاهده‌شده در چاه‌های پیزومتری و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها استفاده شد. در این تحقیق مهرماه سال ۱۳۹٤ به‌عنوان ماه پایه برای واسنجی مدل در حالت رژیم پایدار انتخاب شد. در این حالت بعد از اجرای مدل، ابتدا از روش واسنجی اتوماتیک (PEST) جهت واسنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی، میزان تغذیه و تخلیه استفاده شد و محدوده تقریبی پارامترها مشخص شد و برای رسیدن به واسنجی دقیق‌تر از روش سعی و خطا (دستی) استفاده شد که علاوه بر پارامترهای ذکر شده، ارتفاع سنگ بستر و مرزهای دشت از نظر هد هیدرولیکی ثابت نیز تغییر داده شد تا درنهایت سطح ایستابی اندازه‌گیری شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای بسیار نزدیک گردد.

پس‌ازآنکه واسنجی مدل در شرایط ماندگار انجام شد و میزان هدایت هیدرولیکی، ارتفاع سنگ بستر و مرزها مشخص شد، در این مرحله به واسنجی ضریب ذخیره و میزان تغذیه و تخلیه پرداخته شد که عوامل تغذیه و تخلیه در یک دوره ۳ ساله ۱۳۹٦-۱۳۹٤ با ۱۲ دوره تنش به مدل وارد گردید و به روش آزمون سعی و خطا مورد واسنجی قرار گرفت و همچنین از روش واسنجی اتوماتیک PEST برای تخمین میزان ضریب ذخیره

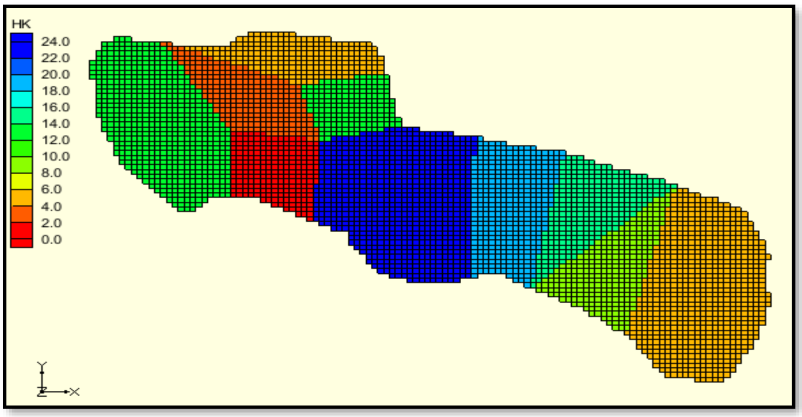
استفاده گردید. در خلال این فرآیند معیار واسنجی سطح ایستابی مشاهده‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای برای ۱۲ ماه، دوره شبیه‌سازی بود، همچنین نتایج حاصل از این مرحله با کمک پارامتر RMSE موردبررسی قرار گرفت. درنهایت در مدل واسنجی شده آبخوان محدوده موردمطالعه، با تعیین عدم قطعیت داده‌های ورودی، پارامترهای مدل‌سازی در دامنه‌ی معقول و مشخص تغییر داده شدند. حساس‌ترین پارامتر، پارامتری است که کمترین تغییر در آن موجب بیش‌ترین تغییر در واسنجی شود. در این مطالعه با استفاده از بسته PEST از نرم‌افزار GMS، حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف سنجیده شد.

جهت اجرای سناریوهای پیش‌بینی چون خشکسالی و کمبود بارندگی بر منابع آب زیرزمینی و رطوبت خاک و جریان رودخانه مؤثر است (Porhaghi, et al. 2014) و با توجه به این‌که با پیش‌بینی و مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی می‌توان نقاط حساس به کاهش و افزایش تغذیه را شناسایی و برای مدیریت بهتر از آن‌ها استفاده نمود، بنابراین از آمار ۱۳ سالهٔ بارندگی موجود در منطقه که از ادارهٔ کل هواشناسی استان فارس گرفته شد، استفاده گردید. بر طبق این آمار، میانگین بارندگی حوضه از سال ۱۳۸۷ تا سال ۱۳۹۹، ۲۱۷/۵۷ میلی‌متر است. کم‌ترین میزان بارندگی در حوضه مربوط به سال ۱۳۸۷ با ۵۰/۱۲ میلی‌متر بارش و بیش‌ترین میزان بارش مربوط به سال ۱۳۹۵ با ٤۹۹/٤ میلی‌متر بارش گزارش شده است. پس با توجه به میانگین و حداقل بارش در این دورهٔ ۱۳ ساله سناریوهای پیش‌بینی با تداوم شرایط کنونی و کاهش و افزایش ۲۰ درصدی بارش به مدل اعمال شد.

۳- نتایج و بحث

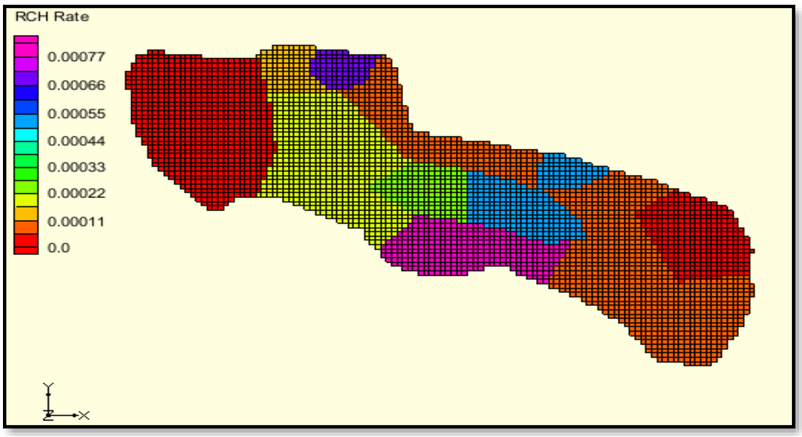
با توجه به نتایج مقادیر واسنجی شدهٔ هدایت هیدرولیکی به دست آمده پس از کالیبراسیون مدل در محدوده مدل‌سازی و در شرایط پایدار نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر در قسمت مرکزی حوضه متمرکز شده (شکل ۷) و بیش‌ترین میزان تغذیه نیز در مرکز و جنوب دشت قرار دارند (شکل ۸) که با توجه به شکل و توپوگرافی حوضه مقادیر قابل قبولی به‌حساب می‌آیند؛ بنابراین در مرحلهٔ بعد مقایسه بین سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده در محل چاه‌های مشاهداتی در پایان دوره واسنجی پایدار انجام گرفت و تفاوت آن‌ها مشخص شد (جدول ۱). همچنین اختلاف سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای با محاسباتی در دوره واسنجی

پایدار به‌صورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است (شکل ۹). با توجه به جدول ۱ و شکل ۹ می‌توان دریافت که اختلاف تراز چاه‌های مشاهداتی و محاسباتی در تمام چاه‌ها کم‌تر از یک متر است به‌استثنای چاه شمارهٔ ۷ که این اختلاف ۱/۰۵ متر است که نتایج قابل قبولی می‌باشند که می‌توان این مدل‌سازی را در شکل ۱۰ مشاهده نمود. همان‌طور که گفته شد چون حداکثر اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب، ±۱ در نظر گرفته شده است در این شکل رنگ سبز پیزومترها نشان می‌دهد که معیار واسنجی در حالت ماندگار به‌خوبی رعایت شده و تفاوت مقادیر مشاهداتی و محاسباتی کمتر از (±۱) است.



شکل ۷- مقادیر واسنجی‌شدهٔ هدایت هیدرولیکی در محدوده مدل‌سازی طی کالیبراسیون مدل در شرایط پایدار

Fig.7. Calibrated hydraulic conductivity values in the modeling area during steady-state calibration



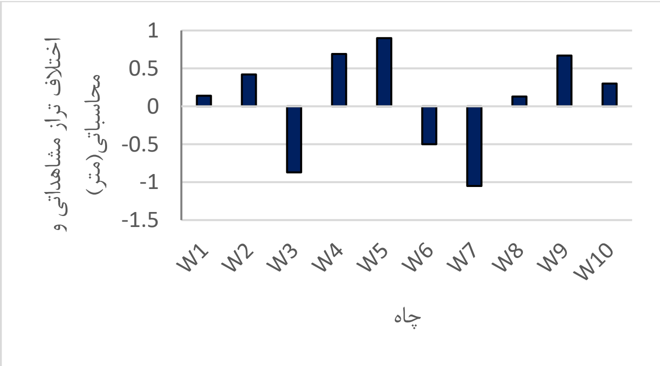
شکل ۸- مقادیر واسنجی شدهٔ تغذیه طی کالیبراسیون مدل در شرایط پایدار

Fig.8**.** Calibrated recharge values during steady-state model calibration

جدول ۱- تراز مشاهداتی و محاسباتی در حالت پایدار

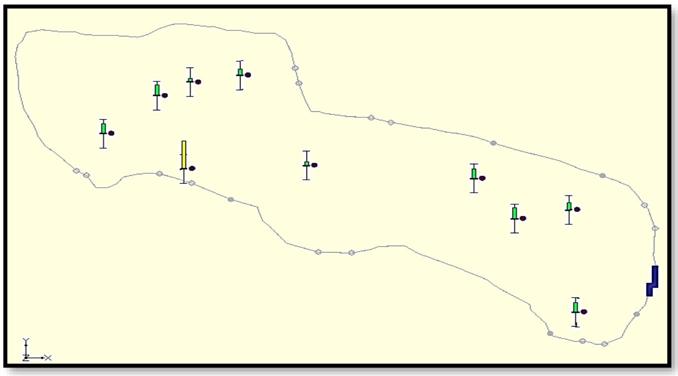
Table1- Observational and computational balance in steady state

چاه	مشاهداتی (متر)	محاسباتی (متر)
W1	۹۷۹/۷٤	۹۷۹/۸۸
W2	۹۹۲/۱۲	۹۹۲/٥٤
W3	۹۱۱/۰۷	۹۱۰/۲
W4	۹۷۲/۱۸	۹۷۲/۸۷
W5	۱۱۱۹/۳۱	۱۱۲۰/۲۱
W6	۱۰۳۱/۷۱	۱۰۳۱/۲۱
W7	۱۰۳۹/۱۷	۱۰۳۸/۱۲
W8	۱۰٥٥/۱	۱۰٥٥/۲۳
W9	۹۸٦//٥۸	۹۸۷/۲٥
W10	۹۷۳/۳	۹۷۳/٦



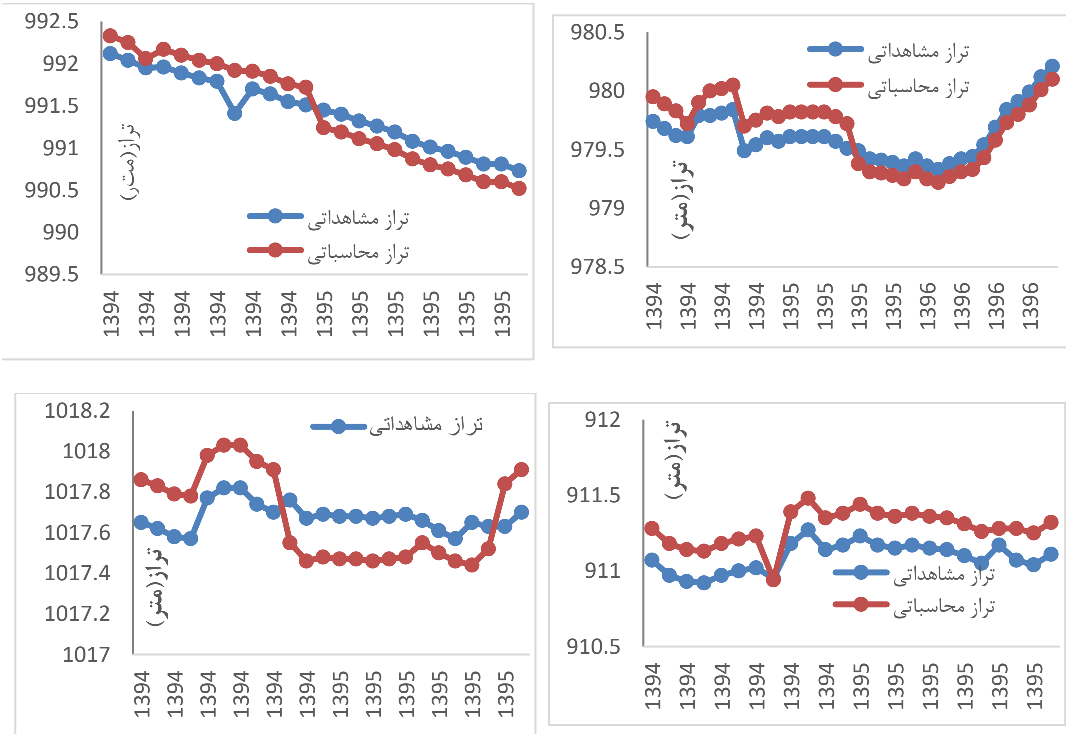
شکل ۹- مقایسه بین سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در پایان دوره واسنجی پایدار

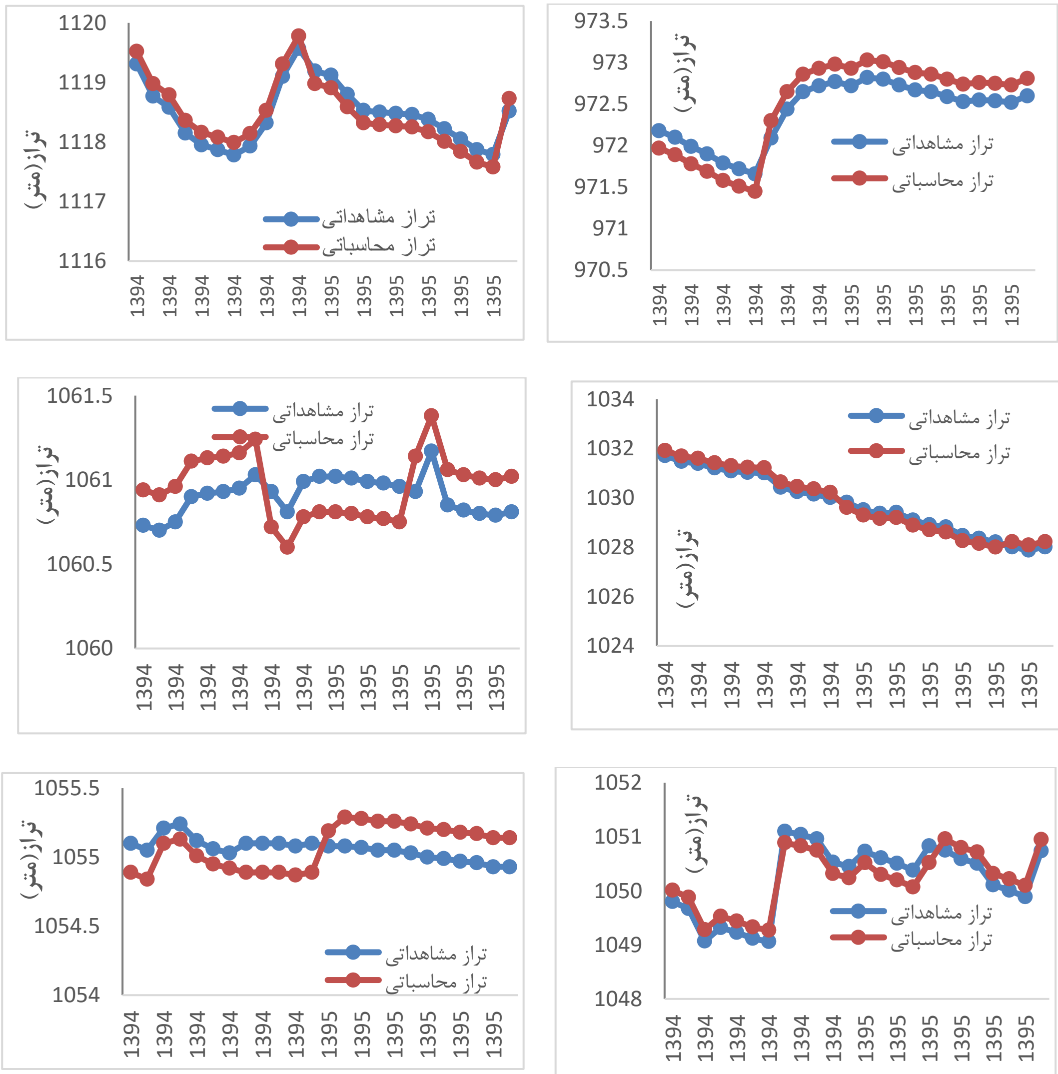
Fig.9. Comparison between observed and calculated water levels at the end of the steady-state calibration period



شکل ۱۰- چاه‌های مشاهداتی آبخوان در محدوده مدل‌سازی

Fig.10. Observation wells of the aquifer in the modeling area





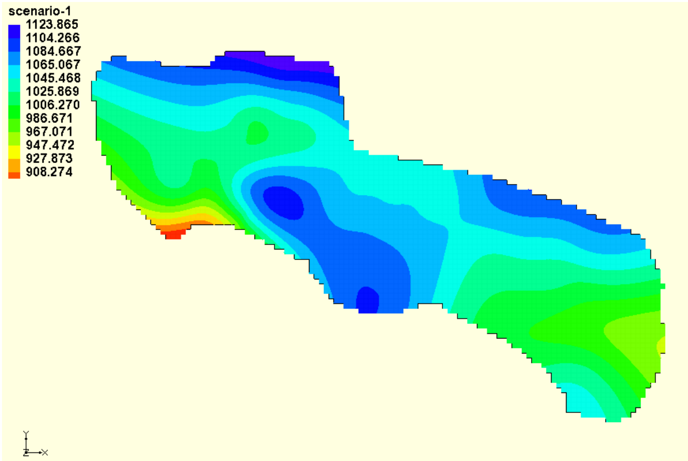
شکل ۱۱- مقادیر مدلسازی و مشاهداتی آبخوان در محدوده مدل‌سازی

Fig.11. Modeled and observed values of the aquifer in the modeling area

در شرایط غیرماندگار نیز مانند شرایط ماندگار واسنجی به‌وسیله ترکیبی از دو روش خودکار PEST و سعی و خطای دستی، انجام شده و مقادیر آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی برای سطح محدوده مدل‌سازی واسنجی شد. همچنین در حالت غیرماندگار حداکثر اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب (۱±) در نظر گرفته شد (شکل ۱۱).

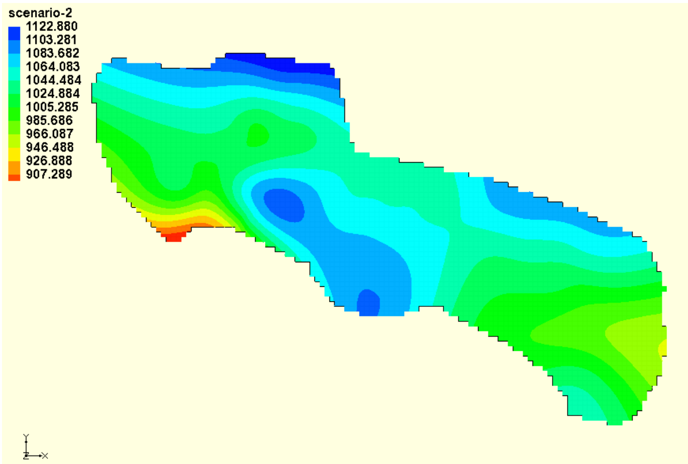
بر اساس شکل ۱۱ می‌توان مشاهده نمود که در حالت غیرماندگار نیز در تمام چاه‌ها معیار واسنجی به‌خوبی رعایت شده و تفاوت مقادیر مشاهداتی و محاسباتی کمتر از (±۱) است. پس با دقت زیادی می‌توان به نتایج سناریوهای پیش‌بینی اعتماد نمود.

بنابراین سناریوی اول با تداوم شرایط کنونی (شکل ۱۲)، سناریوی دوم با کاهش ۲۰ درصدی بارش (شکل ۱۳) و سناریوی سوم با افزایش ۲۰ درصدی بارش (شکل ۱٤) در نظر گرفته شد.



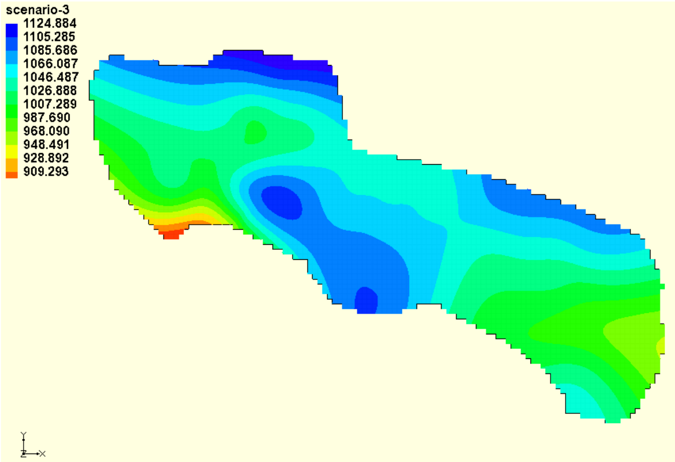
شکل ۱۲- سناریوی پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی با ادامهٔ روند کنونی

Fig.12. Scenario predicting groundwater level with the continuation of the current trend



شکل ۱۳- سناریوی پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی با کاهش ۲۰ درصدی بارش

Fig.13. Scenario predicting groundwater level with a 20% reduction in precipitation



شکل ١٤- سناریوی پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی با افزایش ۲۰ درصدی بارش

Fig.14. Scenario predicting groundwater level with a 20% increase in precipitation

درنهایت نتایج پیش‌بینی شرایط در سه مورد سناریو به دست آمد که بر پایهٔ تغییر میزان بارش در منطقهٔ موردمطالعه تعریف شده است. در سناریوی اول امتداد شرایط حاضر و در سناریوهای دوم و سوم میزان کاهش و افزایش ۲۰ درصدی بارش در نظر گرفته شد؛ بنابراین با توجه به داده‌های تراز چاه‌های مشاهداتی سال ۱۳۹٦ که حداقل ۹۱۱/۰٦ و حداکثر ۱۱۲۳/٤٥ را نشان می‌دهند در نظر گرفتن امتداد شرایط حاضر سطح آب در حالت حداقل به مقدار ۹۰۸/۲۷٤ می‌رسد که ۲/۷۸٦ متر کاهش را نشان می‌دهد. با حالت کاهش ۲۰ درصدی بارش این اختلاف به ۷۷/ ۳ متر و با افزایش ۲۰ درصدی بارش این اختلاف به ۱/۷۷ متر می‌رسد؛ یعنی با کاهش و افزایش بارش تقریباً ۱ متر بر میزان سطح تراز آب در سناریوی امتداد شرایط، کاسته و افزوده خواهد. میزان حداکثر سطح تراز نیز این شرایط را دارا می‌باشد که با توجه به در نظر گرفتن سه سالهٔ سطح تراز (۱۳۹٤-۱۳۹٦) سناریوی اول گویای این مطلب است که با امتداد شرایط کنونی هر سه سال ۲/۷۸٦ متر از میزان سطح تراز آب کاسته خواهد شد. صحت این موضوع را می‌توان در گزارش ۱۰ سالهٔ چاه‌های بهره‌برداری مربوط به سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس (۱۳۹٤) مشاهده کرد. بر اساس گزارش مذکور در سال ۱۳۸۸ از تعداد ١٦٦ چاه بهره‌برداری موجود در منطقه، ٤۳ چاه متروکه و خشک می‌باشند که این رقم در سال ۱۳۹۸ از تعداد ۳۰۲ چاه مشاهداتی به ١٤٥ چاه متروکه و خشک رسیده است که از پایین رفتن سطح تراز در ده سال مذکور حکایت دارد. بر این اساس می‌توان همچون پژوهش‌های قبل قدرت مدل

MODFLOW در مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف را تأیید نمود (Rahmawati et al., 2013; Shakoor et al., 2018; Porhaghi et al., 2014; Heydari & Jabbari, 2022)

نکتهٔ قابل‌توجه دیگر نیز در سناریوها وجود حداقل سطح تراز آب‌های زیرزمینی در شرق و غرب حوضه می‌باشد که می‌تواند آسیب‌پذیری منابع آب در این قسمت‌ها را بیشتر نماید؛ بنابراین براساس این نتایج ذخیرهٔ آب‌های سطحی در منطقه جهت افزایش سطح تراز آب‌های زیرزمینی ضروری است. همانند پژوهش (Shakoor et al., 2018)که تغذیه مصنوعی جهت افزایش سطح تراز را پیشنهاد دادند؛ بنابراین اولین اقدام در جهت ذخیرهٔ منابع آب سطحی آگاهی از وضعیت کیفی منابع آب سطحی و شناسایی منشأ شوری منابع آب‌وخاک می‌باشد.

بر این اساس از مهم‌ترین عوامل تغیر کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه عوامل انسانی می‌باشد. به‌طوری‌که می‌توان به‌طور واضحی تأثیر فعالیت انسانی را در گزارش‌های سازمان سهامی آب منطقه‌ای (۱۳۹٤) در این حوضه مشاهده کرد. بر طبق گزارش این سازمان در دورهٔ مطالعاتی (۱۳۸۸–۱۳۹۸) هرساله نزدیک به ۳۰ میلیون مترمکعب آب از چاه‌ها استخراج می‌شده است که به‌مرور به‌دلیل خشک شدن برخی چاه‌ها این مقدار به ۲۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۸ رسیده است که با توجه به بیلان منفی منابع آب زیرزمینی در این حوضه، سالانه اضافه برداشت از مخازن آب به میزان ۰/٦۷۱ میلیون مترمکعب وجود دارد که این موضوع به‌تدریج از سطح تراز آب زیرزمینی در این مخازن کاسته و بر میزان هدایت الکتریکی آب افزوده شده است. (Heydari & Jabbari, 2022) نیز در پژوهشی که در دشت مرودشت استان فارس انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که میزان برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی رابطهٔ مستقیمی با افت آب‌های زیرزمینی دارد؛ که این امر می‌تواند بر گسترش شوری منابع آب‌وخاک منطقه کمک کند (Ansari et al., 2023; Ansari &jabbari,2023)؛ و ازآنجاکه این آب‌ها در محدودهٔ زمین‌های زراعی استفاده شده است و در جنوب شهر دبیران بر افزایش شوری خاک زمین‌های زراعی افزوده شده است می‌توان با دقت بیشتری به این موضوع توجه نمود. ولی براساس کاهش سطح تراز و افزایش هدایت الکتریکی از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۹ می‌توان تأثیر

فعالیت‌های انسانی را در تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی ۳٤/۷ درصد و تأثیر عوامل طبیعی را ٦٥/۳ درصد تخمین زد (Ansari et al., 2023).

٤- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تداوم شرایط حاضر سطح آب ۲/۷۸٦ متر کاهش می‌یابد. با حالت کاهش ۲۰ درصدی بارش این اختلاف به ۷۷/ ۳ متر و با افزایش ۲۰ درصدی بارش این اختلاف به ۱/۷۷ متر می‌رسد؛ یعنی با کاهش و افزایش بارش تقریباً ۱ متر بر میزان سطح تراز آب در سناریوی تداوم شرایط، کاسته و افزوده خواهد. میزان حداکثر سطح تراز نیز این شرایط را دارا می‌باشد که با توجه به در نظر گرفتن سه سالهٔ سطح تراز (۱۳۹٤–۱۳۹٦) سناریوی اول گویای این مطلب است که با تداوم شرایط کنونی هر سه سال ۲/۷۸٦ متر از میزان سطح تراز آب کاسته خواهد شد و اگر بارش ۲۰ درصد کاهش یابد این رقم به ۳/۷۷ خواهد رسید و در شرایط بسیار خوش‌بینانه (سناریوی سوم) هر سه سال ۱/۷۷ متر از سطح تراز آب زیرزمینی منطقه کاسته خواهد شد که بسیار برای حوضه چالش‌برانگیز می‌باشد و مدیریت مناسبی را می‌طلبد.

بنابراین براساس این نتایج ذخیرهٔ آب‌های سطحی در منطقه جهت افزایش سطح تراز آب‌های زیرزمینی ضروری است. همچنین تحلیل نتایج نشان داد که از مهم‌ترین عوامل تغیر کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه عوامل انسانی مانند افزایش زمین‌های زیرکشت و به دنبال آن افزایش چاه‌های بهره-برداری و افزایش برداشت آب زیرزمینی می‌باشد که جهت مدیریت این منابع باید مدنظر قرار گیرد.

درنهایت نتایج نشان دهندهٔ قدرت مدل MODFLOW در مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف است.

References

Abbasnouvinpour, E., Karimi, F., & Rezaie, H. (2022). The Prediction of Groundwater Level in Ghorve Plain Using MODFLOW Model in Different Scenarios of LARS-WG Climate Change. *Water and Soil Science*, *32*(4), 61-73. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ws.2021.30465.2197

Afruzi, A., & Zare Abyaneh, H. (2017). Groundwater Level Modeling and Forecasting Using the Time Series Models (Case Study: The Plains of Hamadan Province). *Journal of Watershed Management Research*. *8*(15), 102-111. [In Persian] https://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.102

Akhoni Pourhosseini F., Asadi, E. (2017). Bayesian networks, Gamma Test, Groundwater level, Model Least Squares Support Vector Machine, Plain Ardebil. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*; 11 (36), 33-42. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1396.11.36.7.9

Ansari, M., Jabbari, I. & Sargordi, F. (2023). The Effect of Water Resources on Spatial and Temporal Change of Soil Salinity in Izdkhast Playa, Fars Province Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195(63), 1-15. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10678-5

Ansari,M. & Jabbari, I. (2023). Investigating spatial and temporal changes in the quality underground water sources in the Izadkhash basin .*Physical Geography Quarterly*, 15(60) ,1-16. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1402.16.60.3.2

Ansari, M., Jabbari, I., & Sargordi, F. (2021)a. Spatial Modelling of Water Quality Parameters Based on Geological Formations. *Hydrogeomorphology*, *8*(26), 117- 137. [In Persian] https:/ /doi.org/10.22034/hyd.2021.44081.1571

Ansari, M., Jabbari, I., & Sargordi, F. (2021)b. Use of Morphometric Indicators to Identify the Source of Salinity in Playa (Case Study Izadkhast Playa Fars Province). *Quantitative Geomorphological Research*, *10*(3), 134-156. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_141043.html

Atayizadeh, S., Chit Sazan, M. (2018). *Investigating the Impact of Drought on the Quantitative Reduction of Underground Water in Maidaoud Plain Using a Mathematical Model*. The second national conference on the effects of drought and its management solutions. Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center and Isfahan Governorate's Unforeseen Events Headquarters. Isfahan. [In Persian]

Chidepudi, S.K.R., Massei, N., Massei, A., Henriot, A., Allier, D., Baulon, L. (2023). A Wavelet-Assisted Deep Learning Approach for Simulating Groundwater Levels Affected by Low-Frequency Variability. *Science of the Total Environment.* 865. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161035

Heydari, A., & Jabbari, I. (2022). Simulation of Marvdasht Groundwater Level and Investigation of Forecast Scenarios Using MODFLOW Mathematical Code. *Hydrogeomorphology*, *8*(29), 172-149. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1400.8.29.8.3

Jovanovic, N. Z., Israel, S., Tredoux, G., Soltau, L., Le Maitre, D., Rusinga, F., Rozanov, A., van der Merwe, N., (2009). Nitrogen dynamics in land cleared of alien vegetation (Acacia saligna)

and impacts on groundwater at Riverlands Nature Reserve (Western Cape, South Africa). *Water SA*, 35(1), 37-44. https://doi.org/10.4314/wsa.v35i1.76653

Kamali Ardakani, E., Bemani Kharanagh, A., Hayatzadeh, M., & Toshsi, G. (November, 2019). Investigation of modeling techniques in studies related to changes in underground water.The first international conference and the fourth national conference on protection of natural resources and environment. Mohaghegh Ardabili University, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardabil. [In Persian]

Katibeh, H., & Hafezi, S. (2005). Application of Modflow in Groundwater Management and Evaluation of Artificial Recharge Project of Ab-Barik Aquifer (Bam). *Journal of Water and Wastewater, 15*(2), 45-58. [In Persian]

Knotters, M., & Bierkens, M. F. (2001). Predicting water Table Depths in Space and Time using a Regionalised Time Series Model. *Geoderma*, 103(1-2), 51–77. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00069-6

Kushwaha, R.K., Pandit, M.K., Goyal, T., (2009). MODFLOW Based Groundwater Resource Evaluation and Prediction in Mendha Sub-basin, NE Rajasthan, *Journal geological society of India*, 74, 449–458. https://doi.org/10.1007/s12594-009-0154-1

Mackay, J.D., Jackson, C.R. & Wang, L. (2014). A Lumped Conceptual Model to Simulate Groundwater Level Time-series. *Environmental Modelling & Software*, 61, 229-245. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.003

Masoumi, F., Najjar-Ghabel, S., & Safarzadeh, A. (2021). Automatic Calibration of Groundwater Simulation Model (MODFLOW) by Indeterministic SUFI-II Algorithm. *Amirkabir Journalof Civil Engineering, 53*(4), 1507-1524.
https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16990.6426

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model. In: Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, *U.S. Geological Survey*, 588.
https://doi.org/10.3133/twri06A1

Mehl, S., Hill, M.C. (2010). Grid-size dependence of Cauchy boundary conditions used to simulate stream-aquifer interactions, Advances in Water Resources, 33(4), 430-442. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.01.008

Mirzaei. A., & Nazemi, A. (2011). Water Table Elevation Prediction in the Shabestar Plain Using the Artificial Intelligence Techniques. *Water Resources Engineering*, *4*(8), 1-10.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1390.4.8.1.7

Mondal, N. C., Singh. V. S. (2009). Mass transport modeling of an industrial belt using visual MODFLOW and MODPATH: A case study. *Journal of Geography and Regional Planning* 2(1), 001-019. https://doi.org/10.5897/JGRP.9000103

Pande, C.B., Moharir, K.N., Singh, S.K., Elbeltagi, A., Bao Pham, Q., Panneerselvam, B., Varade, A.M., Kouadri, S. (2022). Groundwater Flow Modeling in the Basaltic Hard Rock Area of Maharashtra, India. *Applied Water Science*, 12(12) 1-14. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01525-y

Parameswari, K., Mudgal, B. V. (2015). Assessment of Contaminant Migration in an Unconfined Aquifer Around an Open Dumping Yard: Perungudi a Case Study. *Environmental Earth Sciences,74*(7),6111-6122. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4634-x

Patil, N.S., Chetan, N.L., Nataraja, M., Sutharb, S. (2020). Climate Change Scenarios and its Effect on Groundwater Level in the Hiranyakeshi Watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, 10. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100323

Porhaghi, A., Akhondali, A., Radmanesh, F., & Mirzaee, S. (2014). Manage the Groundwater Sources Exploration of the Nourabad Plain in the Drought Conditions with MODFLOW Modeling. *Irrigation Sciences and Engineering*, *37*(2), 71-82. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.25885952.1393.37.2.7.7

Rahmawati, N., Vuillaume, J.F. & Purnama, I.L.S. (2013). Salt Intrusion in Coastal and Lowland Areas of Semarang City, *Journal of Hydrology*, 494, 146-159. https://doi.org/ 10.1016/j.jhydrol.2013.04.031

Rajabi, K., Nikbakht Shahbazi, A., Fathian, H., & Zohrabi, N. (2021). Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code, *Iran-Water Resources Research*, *16*(4), 112-126. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.4.8.8

Rashvand, M., Li, J., Liu, Y. (2019). Coupled Stress-Dependent Groundwater Flow-Deformation Model to Predict Land Subsidence in Basins with Highly Compressible Deposits. *Hydrology***,** 6(3), 78. https://doi.org/10.3390/hydrology6030078

Rayne, T. W., Bradbury, K., Muldoon, M. (2001). Report: Delineation of Capture Zones for Municipal Wells in Fractured Dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA, *Hydrogeology Journal*, 9, 432–450. https://doi.org/10.1007/s100400100154

Shakoor, M., Khan, Z. M., Farid, H. U., Ahmad, F., Arshad, M., Qamar, U., Ahmad, R., & Sultan, M. (2018). Development of Groundwater Flow Model (MODFLOW) to Simulate the Escalating Groundwater Pumping in the Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(3), 635-644. https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.4909

Shakya, C. M., Bhattacharjya, R. K., Dadhich, S. (2022). Groundwater Level Prediction with Machine Learning for the Vidisha District, a Semi-Arid Region of Central India, *Groundwater for Sustainable Development*, 19. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100825

Tao, H., Hameed, M.M., Marhoon, H.A., Zounemat-Kermani, M., Heddam, S., Kim, S., et al. (2022). Groundwater Level Prediction Using Machine Learning Models: A Comprehensive Review, *Neurocomputing*, 489, 271-308. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.03.014

Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. & Zhou, X. (2008). Application of MODFLOW and geographical information system to groundwater flow simulation in North plain, China. *Environmental Geological*, 55, 1449-1462. https://doi.org/10.1007/s00254-007-1095-x

Yanxun, S., Yuan, F., Hui, Q., Xuedi, Zh. (2011). Research and Application of Groundwater Numerical Simulation-A Case Study in Balasu Water Source. *Procedia Environmental Sciences*, 8,146–152. http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2011.10.024